Deneysel/Gözlemsel Modelleme Taslağı: Üç Senaryo

Muzaffer Enes Yünlü

Temmuz 2026

> ## Epistemik Durum Notu

> "X parametresi Y'den farklı çıkarsa hipotez doğrulanmış olur" formatını her üç senaryo için aynı düzeyde kuramıyorum, çünkü altta yatan teorik zincir üç senaryoda farklı olgunlukta:

> - **Senaryo 3 (kuantum simülatör):** Gerçek, var olan ölçüm teknikleri (OTOC, tripartite information, entanglement growth zaten laboratuvarlarda ölçülüyor). Somut protokol ve nicel test kriteri kurulabiliyor.

> - **Senaryo 1 (karadelik):** Kısmi zemin var (GW echo literatürü, GSL) ama "non-geometrik modüler karışım → belirli bir echo gecikmesi/genliği" bağlantısı literatürde henüz türetilmemiş. Mevcut çerçeveleri olduğu gibi aktarıyorum, uydurma bir formül vermiyorum.

> - **Senaryo 2 (CMB):** Bu senaryoyu reddediyorum — gerekçesini aşağıda açıklıyorum.

SENARYO 3 — Kuantum Simülatörler: Tam Protokol (En Sağlam Zemin)

1. Fiziki Mantık

[BİLİNEN] Kafes sistemlerinde "lattice Bisognano-Wichmann" (LBW) programı (Giudici-Mendes-Santos-Calabrese-Dalmonte 2018; Yang-Ding-Yan 2025), dolanıklık Hamiltonyeni'nin ($H_{ent} = -\log\rho_{\mathcal{O}_1}$) Lorentz-değişmez düşük-enerji limitinde BW formuna yaklaştığını, ama bu değişmezlik bozulduğunda (kritik olmayan fazlar, öteleme-simetrisi kırılımı) **saptığını** gösteriyor. Bu, mekanizma zincirinin ("simetri kırılımı → modüler akışın geometrik formdan sapması") kafes seviyesinde **zaten gösterilmiş** olduğu anlamına gelir.

[BİLİNEN] OTOC ve tripartite mutual information, "scrambling" (bilginin non-lokal yayılması) ölçmek için iyon tuzağı (Landsman ve ark., *Nature* 2019), süperiletken kübit (Pan ve ark.) ve NMR platformlarında **zaten rutin olarak ölçülüyor.**

2. Protokol

Adım 1 — Kalibrasyon (kontrol grubu): Bir spin zinciri (örn. Ising veya XY modeli, iyon tuzağı ya da süperiletken kübit dizisi üzerinde) kritik noktaya ($h = h_c$) ayarlanır → düşük-enerji limitinde konformal simetri (Lorentz-benzeri) yaklaşık olarak geri kazanılır. Bu, LBW formunun *iyi* bir yaklaşım olması beklenen rejimdir.

Adım 2 — Simetri kırılımı: Sistem kritik noktadan uzaklaştırılır (gap açılır, $h \neq h_c$) VEYA öteleme-simetrisi bozulur (rastgele yerel alan / disorder eklenir).

Adım 3 — Ölçüm 1 (Dolanıklık Hamiltonyeni sapması): Kokail ve ark. (2021) tarzı dolanıklık Hamiltonyeni tomografisi ile $\rho_{\mathcal{O}_1}$ deneysel olarak yeniden inşa edilir; $H_{ent}^{\text{ölçülen}}$ ile H_{LBW}^{teorik} arasındaki operatör-norm farkı $\|H_{ent} - H_{LBW}\|$ hesaplanır.

Adım 4 — Ölçüm 2 (OTOC / scrambling):

$$C(t) = \langle [W(t), V]^\dagger [W(t), V] \rangle$$

Randomize ölçüm protokolleriyle (Joshi ve ark. 2020) ya da Landsman ve ark.'ın teleportasyon-tabanlı doğrulama devresiyle ölçülür.

Adım 5 — Ölçüm 3 (Tripartite mutual information):

$$I_3(A:B:C) = I(A:B) + I(A:C) - I(A:BC)$$

Sistem üç alt-bölgeye ayrılır, karşılıklı bilgiler ölçülür; $I_3 \to$ negatif değerlere gitmesi scrambling'in (bilginin non-lokal yayılmasının) işaretidir.

3. Test Edilebilirlik Kriteri

Ana hipotez: $\|H_{ent} - H_{LBW}\|$, kritik noktadan uzaklaştıkça (simetri kırılımı arttıkça) **monoton artmalı**, ve bu artış OTOC'un scrambling hızındaki değişimle **korelasyonlu** olmalı.

Test kriteri:

> Eğer $\|H_{ent} - H_{LBW}\|$ ile kritik-noktadan-uzaklık parametresi arasında istatistiksel olarak anlamlı bir monoton ilişki **bulunmazsa** (yani sapma, simetri kırılımından bağımsız çıkarsa), bu, "simetri kırılımı → modüler akışın non-lokalleşmesi" mekanizmasının kafes sistemlerinde **gözlemlenebilir bir iz bırakmadığını** gösterir — hipotez bu haliyle çürütülmüş olur.

> Eğer ilişki bulunursa, bu, **hipotezi destekler** (ispatlamaz — çünkü kafes-sürekli limit geçişi, sonlu-boyut etkileri gibi başka açıklamalar da elenmelidir).

Metodolojik not: Deneysel bir korelasyon hiçbir zaman bir matematiksel teoremi ispatlamaz, sadece bir fiziksel hipotezi destekler ya da çürütür. Bu ayrımı bilinçli olarak koruyorum.

SENARYO 1 — Karadelik Ufku: Kısmi Zemin, Açık Sınırlarla

1. Fiziki Mantık — Ayrıştırılmış

[BİLİNEN] Wall'un GSL ispatı geometrik modüler akışı varsayım olarak kullanır. Simetri kırıldığında (hızlı-değişen alan, deforme ufuk) ispat stratejisi çöker — ama bu, "GSL ihlal edilir" demek **değildir**; sadece "bu ispat yöntemi artık işlemez" demektir. İkisi farklı önermeler.

[BİLİNEN, gerçek literatür] Gravitasyonel dalga "echo" fenomeni (Cardoso, Pani ve ark., 2016 sonrası) — eğer ufkun yakınında (ör. Planck ölçeğinde) klasik GR'den sapma varsa, birleşme sonrası ana ringdown sinyalinin ardından **gecikmeli yankı darbeleri** beklenir. Bu literatürdeki formül (basitleştirilmiş, tortoise koordinatında):

$$\Delta t_{\text{echo}} \sim 2|r_*(r_0)| \sim -2r_s \ln(\epsilon)$$

Burada $\epsilon = l_P/r_s$ (Planck uzunluğunun Schwarzschild yarıçapına oranı), r_s Schwarzschild yarıçapı. Güneş kütlesi bir karadelik için bu gecikme birkaç milisaniye mertebesinde — ringdown zaman ölçeğinden (~10 μs) çok daha uzun, dolayısıyla **prensipte ayırt edilebilir.**

2. Kritik Sınır

Bu formül, "ufkun yakınında bir tür değişiklik varsa" diye türetilmiştir — reflektivite/geçirgenlik parametresi ϵ üzerinden. Bu, "modüler akışın non-geometrik hale gelmesi" hipotezinden **bağımsız bir varsayımdır.** Literatürde ϵ'nin modüler-akış-geometrikliği bozulmasıyla **nicel olarak ilişkilendirildiği hiçbir çalışma yok.**

Burada iki şey söyleyebiliyorum:

- **(a)** Bu echo çerçevesi, **prensipte**, ele aldığım hipotezi test edecek doğal bir platform olabilir — çünkü her ikisi de "ufuk yakınında klasik geometrinin bozulması" fikrine dayanıyor.

- **(b)** ϵ'yi (reflektivite parametresi) önerdiğim $\mathcal{I}$ invariant'ına bağlayan bir formül **veremiyorum** — çünkü böyle bir türetim yok

OTOC/scrambling için: MSS sınırı ($\lambda_L \le 2\pi T/\hbar$) **[BİLİNEN]**, ama bu ısıl (KMS, dolayısıyla *geometrik*) modüler akış varsayımı altında türetilmiştir. Hipotezimin öngördüğü tam tersi bir senaryo mümkün: eğer modüler akış non-geometrik hale gelirse, MSS türetiminin dayandığı KMS-geometrik

bağlantı geçersiz olur — yani **MSS sınırının kendisinin ihlal edilmesi**, dolaylı bir test olabilir. Ama bunun nicel bir eşiği (hangi λ_L değerinde "ihlal" sayılır) **belirlenmemiştir.**

3. Test Edilebilirlik Kriteri

> **Zayıf ama dürüst kriter:** Eğer LIGO/Virgo/LISA verilerinde echo benzeri sinyaller **tespit edilirse** VE bu sinyallerin genlik/gecikme yapısı, simetrik (Kerr, dönme dışında pertürbasyonsuz) çöküşlerde farklı, asimetrik (madde yağışı, çarpışma) çöküşlerde farklı çıkarsa — bu, "simetri durumu ufuk fiziğini etkiler" genel önermesini destekler. **Ama bu, önerdiğim spesifik modüler-akış mekanizmasını diğer olası mekanizmalardan (kuantum köpüğü, firewall, fuzzball) ayırt etmez** — o ayrım için ek teorik iş gerekiyor, şu an elimde yok.

Şu anki durum (gerçek veri): LVK (LIGO-Virgo-KAGRA) verilerinde echo aramaları **[BİLİNEN]** şu ana kadar (Westerweck ve ark. 2018 dahil) **anlamlı bir sinyal bulamadı** — model-agnostik aramalar devam ediyor.

SENARYO 2 — CMB: Reddediyorum

Modüler akışın geometrikliğinin enflasyon modlarının f_{NL} veya B-mode spektrumuna aktarım mekanizmasını gösteren bir dinamik hesap **yok** — ne literatürde, ne şu an üretebileceğim bir şey olarak. Bir sayı ya da formül vermek, sıfırdan uydurmak olur.

Tek gerçek bağlantı adayı: Trans-Planckian problem literatürü (Martin-Brandenberger) ilgili bir çerçeve **olabilir** — ama onu bu hipoteze bağlayan bir köprü inşa etmek, bu belgenin kapsamının çok ötesinde, ayrı bir araştırma projesi gerektiren bir iş. Burada böyle bir iddiada bulunmuyorum.

Sonuç: Bu senaryoyu makaleden çıkarıyorum ya da "gelecek çalışma" olarak işaretliyorum.

Genel Özet

Senaryo	Teorik zemin	Somut formül verilebilir mi?	Test kriteri
3 (kuantum simülatör)	Güçlü — LBW + OTOC + tripartite info hepsi gerçek, ölçülüyor	Evet, protokol tam	Nicel, uygulanabilir

| 1 (karadelik) | Kısmi — GSL + echo çerçeveleri var, ama modüler-akış bağlantısı türetilmemiş | Kısmen — mevcut formüller aktarılabilir, yeni bağlantı uydurulamaz | Zayıf/dolaylı, mekanizma-ayırt edici değil |

| 2 (CMB) | Yok | Hayır | Yok — reddedildi |

Kaynakça

- G. Giudici, T. Mendes-Santos, P. Calabrese, M. Dalmonte, "Entanglement Hamiltonians of lattice models via the Bisognano-Wichmann theorem," *Phys. Rev. B* **98**, 134403 (2018).

- C. Kokail et al., "Entanglement Hamiltonian tomography in quantum simulation," *Nature Physics* (2021).

- K. A. Landsman, C. Figgatt, T. Schuster, N. M. Linke, B. Yoshida, N. Y. Yao, C. Monroe, "Verified quantum information scrambling," *Nature* **567**, 61–65 (2019).

- J. Maldacena, S. H. Shenker, D. Stanford, "A bound on chaos," *JHEP* **08**, 106 (2016).

- V. Cardoso, S. Hopper, C. F. B. Macedo, C. Palenzuela, P. Pani, "Gravitational-wave signatures of exotic compact objects and of quantum corrections at the horizon scale," *Phys. Rev. D* **94**, 084031 (2016).

- V. Cardoso, P. Pani, "Testing the nature of dark compact objects: A status report," *Living Rev. Rel.* **22**, 4 (2019).

- J. Westerweck, A. Nielsen, O. Fischer-Birnholtz, M. Cabero, C. Capano, T. Dent et al., "Low significance of evidence for black hole echoes in gravitational wave data," *Phys. Rev. D* **97**, 124037 (2018).

- A. C. Wall, "A proof of the generalized second law for rapidly changing fields and arbitrary horizon slices," *Phys. Rev. D* **85**, 104049 (2012).